

# 后巩膜加固术在病理性近视中的研究进展

黄周懿<sup>1,2</sup>, 廖洪霞<sup>2</sup>, 刘东成<sup>2,3</sup>, 叶秋英<sup>2</sup>, 刘静雯<sup>2</sup>, 卢怡洁<sup>2</sup>, 王彤森<sup>2</sup>, 秦波<sup>2,3</sup>

引用: 黄周懿, 廖洪霞, 刘东成, 等. 后巩膜加固术在病理性近视中的研究进展. 国际眼科杂志, 2026, 26(8): 1400–1404.

基金项目: 深圳市基础研究专项(自然科学基金)项目(No. JCYJ20240813165100001); 深圳眼科医院科研基金项目(No. SZAE2023B03); 爱尔眼科医院集团科研基金(No. AGF2301D34)

作者单位: <sup>1</sup>(518020) 中国广东省深圳市, 暨南大学第二临床医学院; <sup>2</sup>(518032) 中国广东省深圳市, 暨南大学附属爱尔眼科医院; <sup>3</sup>(518100) 中国广东省深圳市爱尔眼科技术研究所

作者简介: 黄周懿, 女, 在读硕士研究生, 研究方向: 眼底病、眼外伤。

通讯作者: 秦波, 男, 博士, 主任医师, 博士研究生导师, 研究方向: 眼底病、眼外伤. qinbo2024@ext.jnu.edu.cn

收稿日期: 2025-12-25 修回日期: 2026-06-25

## 摘要

病理性近视(PM)以眼轴进行性延长、后巩膜葡萄肿及眼底退行性病变为特征, 是亚洲国家主要致盲眼病之一。后巩膜加固术(PSR)是目前唯一手术干预延缓眼轴增长的手段, 机制涉及机械加固、改善血循环及生物刺激巩膜重塑。文章综述 PSR 最新进展: 手术方式从经典复杂术式向标准化单条带技术演变, 联合三维 MRI 量化后巩膜葡萄肿形态以指导个体化植片设计, 推动微创精准化; 植入材料中, 异体硬脑膜等生物材料持续优化, 仿生压电智能材料通过电信号主动促进巩膜胶原合成, 实现从“被动支撑”到“主动强化”的跨越; 临床疗效上, 控制眼轴、改善视功能及血循环、儿童早期干预获益; 联合 ICL、白内障或玻璃体切除术为不同患者提供综合方案。文章还分析了后巩膜葡萄肿异位、二次手术等长期问题及核心争议, 并对人工智能辅助、智能材料转化及全周期防治体系等未来方向进行展望, 以期为临床与科研提供参考。

关键词: 后巩膜加固术; 病理性近视; 眼轴; 植入材料; 联合治疗; 综述

DOI: 10.3980/j.issn.1672-5123.2026.8.16

## Advances in posterior scleral reinforcement for pathological myopia

Huang Zhouyi<sup>1,2</sup>, Liao Hongxia<sup>2</sup>, Liu Dongcheng<sup>2,3</sup>, Ye Qiying<sup>2</sup>, Liu Jingwen<sup>2</sup>, Lu Yijie<sup>2</sup>, Wang Tongmiao<sup>2</sup>, Qin Bo<sup>2,3</sup>

Foundation items: Shenzhen Basic Research Special Project (Natural Science Foundation) (No. JCYJ20240813165100001); Research Fund of Shenzhen Eye Hospital (No. SZAE2023B03); Research Fund of Aier Eye Hospital Group(No. AGF2301D34)

<sup>1</sup>The 2<sup>nd</sup> Clinical Medical College of Jinan University, Shenzhen 518020, Guangdong Province, China; <sup>2</sup>The Shenzhen Aier Eye

Hospital Affiliated to Jinan University, Shenzhen 518032, Guangdong Province, China; <sup>3</sup>The Shenzhen Aier Ophthalmic Technology Institute, Shenzhen 518100, Guangdong Province, China

Correspondence to: Qin Bo. The Shenzhen Aier Eye Hospital Affiliated to Jinan University, Shenzhen 518032, Guangdong Province, China; The Shenzhen Aier Ophthalmic Technology Institute, Shenzhen 518100, Guangdong Province, China. qinbo2024@ext.jnu.edu.cn

Received: 2025-12-25 Accepted: 2026-06-25

## Abstract

• Pathologic myopia (PM) is characterized by progressive axial elongation, posterior staphyloma, and fundus degenerative changes, representing a leading cause of blindness in Asian countries. Posterior scleral reinforcement (PSR) is currently the only surgical intervention to slow axial elongation. Its mechanisms involve mechanical reinforcement, improved blood circulation, and biological stimulation of scleral remodeling. This article reviews recent advances in PSR: surgical techniques have evolved from complex, classic procedures to standardized single-strip methods, incorporating 3D MRI to quantify posterior staphyloma morphology for personalized graft design and facilitating minimally invasive, precision surgery. Among implant materials, biomaterials such as allogeneic dura mater are being continuously optimized, while biomimetic piezoelectric smart materials actively promote scleral collagen synthesis through electrical signals, achieving a paradigm shift from “passive support” to “active reinforcement”. Clinical outcomes indicate advantages in regulating axial length, enhancing visual function and blood circulation, and facilitating early intervention in children. Combined procedures with ICL implantation, cataract surgery or vitrectomy provide comprehensive treatment regimens for individual patients with varied conditions. This article also analyzes long-term issues and core controversies including ectopic posterior staphyloma and reoperation, and prospects future research directions such as artificial intelligence assistance, translation of smart materials and full-cycle prevention and treatment systems, so as to provide references for clinical practice and scientific research.

• KEYWORDS: posterior scleral reinforcement; pathological myopia; axial length; implant materials; combination therapy; review

Citation: Huang ZY, Liao HX, Liu DC, et al. Advances in posterior scleral reinforcement for pathological myopia. Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci), 2026, 26(8): 1400–1404.

0 引言

病理性近视 (pathologic myopia, PM) 是全球范围内,尤其是亚洲国家不可逆致盲的首要原因之一,其最典型的特征为眼轴 (axial length, AL) 进行性异常伸长 (>26 mm)、后巩膜葡萄肿 (posterior scleral staphyloma, PS) 及视网膜脉络膜萎缩、黄斑劈裂、脉络膜新生血管等眼底病变<sup>[1]</sup>。后巩膜加固术 (posterior scleral reinforcement, PSR) 历经半个多世纪的发展,已成为目前公认的、能够有效延缓眼轴增长的唯一手术方式<sup>[2-3]</sup>。PSR 的基本原理在于通过手术将生物或非生物材料固定于薄弱的眼球后极部巩膜 (机械加固学说)<sup>[4]</sup>。同时改善眼球后极部血液循环 (血液循环改善学说)<sup>[5]</sup>。近年来,随着手术技术的精进、植入材料的革新以及联合治疗策略的探索,使 PSR 领域取得了显著进展。本文系统梳理其研究的最新进展,为临床与科研提供参考。

1 后巩膜加固术的作用机制与规范化适应证

**1.1 多重作用机制的协同效应** PSR 的治疗效果建立在多重作用机制的协同基础上。机械加固学说认为植入材料为后极部巩膜,尤其是 PS 区域,提供了直接的物理性支撑,增强了巩膜的结构强度和生物力学性能,从而限制了眼球的扩张和眼轴的生长<sup>[4]</sup>。血液循环改善学说发现术后黄斑区血流密度显著提升,能够缓解视网膜及脉络膜的缺血缺氧<sup>[6-7]</sup>。生物刺激与重塑学说指出异体植入材料作为一种生物刺激物,可能引发局部的、可控的免疫炎症反应,激活成纤维细胞增殖和胶原分泌,从而主动地加强和增厚后极部巩膜<sup>[4]</sup>。

**1.2 手术适应证与禁忌证的精准把握** 根据《单条带后巩膜加固术治疗病理性近视手术操作建议》,患者需满足以下至少两项: (1) 眼轴 ≥ 26 mm 或等效球镜 ≤ -9.00 D; (2) 近视进展 (儿童青少年连续 3 a 每年近视增长 ≥ 1.00 D 或眼轴年增长 ≥ 0.5 mm, 成人亦有相应标准); (3) 合并至少一种 PM 相关眼底并发症<sup>[8]</sup>。禁忌证包括全身情况差、严重眼内黏连、继发性 PM 等。12 岁以下儿童需严格把握指证,3 岁以下尤为谨慎。儿童早期行 PSR 可阻断眼轴病理性进展,降低成年后发生严重后巩膜葡萄肿及黄斑劈裂的风险<sup>[9-10]</sup>。但低龄儿童巩膜弹性大,眼部解剖结构未发育成熟,因此手术中需注重植片材料的生物相容性与固定精准性。

2 手术方式的技术演进与微创化发展

**2.1 从经典术式到主流改良** 早期的 PSR 术式 (片式、Y 型、X 型等) 普遍存在操作复杂、创伤大<sup>[5]</sup> 等缺陷。单条带后巩膜加固术经简化推广,因安全、有效、操作简便成为当前主流的手术方式。其核心步骤包括:术前估算植片长度;经颞下方角巩膜缘切口,分离眼外肌及球后组织,保护下斜肌止端及滑静脉;将植片依次穿过下斜肌、下直肌、外直肌下方,平铺于下斜肌与视神经之间,U 型包裹后极部;用 7-0 可吸收缝线固定于直肌止端后方 2 mm 处<sup>[8]</sup>。

**2.2 微创技术与精准医疗的融合** 3D MRI 可术前量化 PS 形态与分型 (宽黄斑型、窄黄斑型、绕盘型、鼻侧型、下方型等) 指导个性化植片放置。研究表明,宽黄斑型 PS 术后总玻璃体体积减少更显著,控制眼球后段扩张效果优于窄黄斑型 (后者因局部巩膜增厚低、植片贴合难)<sup>[11]</sup>。AI

驱动的多模态分析平台可整合 OCT、OCTA 自动分割病灶、预测并发症风险,在高度近视和近视性黄斑病变的诊断中达到极高的准确率<sup>[12]</sup>。微创手术器械 (如更小的切口、专用的开创器和分离器) 进一步减少手术创伤,加速患者术后康复。上述技术推动了 PSR 向微创化、精准化发展。安广琪<sup>[13]</sup> 基于 3D MRI 对不同 PS 类型的疗效进行比较,结果发现复杂型 PS (Curtin VI-X 型) 患者术后最佳矫正视力 (best-corrected visual acuity, BCVA) 改善显著低于简单型,宽黄斑型 PS (Ohno-Matsui I 型) 虽眼轴最长,但因植片覆盖充分,AL 年增长率低于窄黄斑型。此外,该研究针对特殊位置 PS 提出个性化植片策略:下方型 PS (Ohno-Matsui V 型) 需将植片重点覆盖视神经下方巩膜,术后该区域巩膜厚度增加,绕盘型 PS (Ohno-Matsui III 型) 术前通过 MRI 明确 PS 围绕视神经的分布范围,避免植片压迫视神经,可使视神经损伤率从 3.2% 降至 0%<sup>[13]</sup>。华怡红<sup>[14]</sup> 通过 3D MRI 重建 99 例高度近视患者的眼球形态,发现颞侧偏曲形眼球 (13.1%) 合并颞侧 PS 时,采用“颞侧短缩+鼻侧延长”植片,可将复视发生率从 15.4% 降至 0%,且 PS 最高点内移更优 (0.8 mm vs 0.4 mm)。桶形眼球 (11.1%) 合并广泛后极部 PS 时,采用“U 型植片”覆盖黄斑区及视盘周围,术后 AL 增长显著低于单条带组。鼻侧偏曲形眼球 (41.67%) 合并鼻侧 PS 时,植片向鼻侧适度偏移 1-2 mm,贴合率从 67.3% 升至 81.8%。

综上,3D MRI 通过量化 PS 的形态与位置,明确了简单型 PS (尤其是宽黄斑型) 疗效更优,并为不同位置 PS 提供精准指导,颞侧 PS 需控制植片颞侧延伸长度避免眼外肌牵拉,下方 PS 强化视神经下方植片覆盖,鼻侧 PS 适度偏移植片位置,广泛后极部 PS 则采用 U 型植片整体加固,这些发现为 PSR 的精准化发展提供了重要的影像学支撑与临床实践依据。

3 植入材料的创新探索与分类精细化分析

**3.1 生物材料的深度优化与应用** 在同种异体材料中,异体硬脑膜是目前临床研究与应用的热点,其具有良好生物相容性,可有效控制眼轴和屈光度进展,并显著提升黄斑区的血流密度<sup>[6-7]</sup>,在促进黄斑劈裂复位方面有卓越效果<sup>[15]</sup>。且异体巩膜作为经典材料,其生物力学特性与受体巩膜最为接近,但面临着来源有限的问题<sup>[8]</sup>。经脱细胞和京尼平交联处理的牛心包、猪颅骨等材料弹性模量更接近人类巩膜,抗酶降解能力提升,远期眼轴控制效果更好<sup>[16-17]</sup>。

**3.2 合成材料与智能材料的突破** 当前材料学的前沿已转向智能生物材料。黄炜琳等<sup>[18]</sup> 比较了钛-硅胶复合可塑性植片与异种异体巩膜在兔 PSR 中的安全性与生物学反应。可塑性植片术后 3 d 炎症评分更低 (4.0 vs 9.0),泪液恢复更快;术后 12 wk 安全性相当。组织学显示,异体巩膜与宿主融合紧密,利于生物整合与血供改善,可塑性植片仅被纤维膜包裹、可轻微移动,缺乏生物整合但能精准顶压。两者形成互补。Jiang 等<sup>[19]</sup> 受电鳗启发,成功研发了一种仿生压电补片 (BPP@PVDF)。该材料将牛心包支架与压电聚偏氟乙烯薄膜结合,在机械外力 (如眨眼) 作用下产生微电流,通过电激活方式增强巩膜机械强度,并显著促进巩膜成纤维细胞的胶原合成,使 PSR 材料从

“被动支撑”迈向了“主动生物强化”,在动物实验中展现出控制眼轴增长的潜力。de Francesco 等<sup>[20]</sup>指出巩膜异体移植可能成为一系列新应用和外科用途的理想基质。Chaya 等<sup>[21]</sup>证明了异体生物组织作为植入材料在增强葡萄巩膜流出手术中的生物相容性眼部特征,这为异体材料的安全性提供了进一步支持。

**3.3 材料选择策略** 材料选择应遵循个体化原则,儿童优先考虑生物相容性佳、能促进血供改善的异体硬脑膜;成人复杂病例可评估交联材料或未来智能材料。长期疗效方面,异体硬脑膜能控制眼轴、改善微循环;京尼平交联材料抗酶降解能力强,远期控制效果更稳定<sup>[17]</sup>;仿生压电材料在动物实验中表现出潜力,但无临床数据<sup>[19]</sup>。安全性上,异体硬脑膜未出现明显排异反应<sup>[15]</sup>;京尼平交联材料降低了植片吸收、移位的风险<sup>[17]</sup>;而仿生压电材料仍处于临床前研究阶段。未来方向是兼具生物相容性、力学性能与主动生物活性的复合材料。

4 临床疗效的多维评估与长期安全性

**4.1 核心疗效** PSR 能显著降低眼轴年增长率(从术前 > 0.5 mm 降至 < 0.1 mm)和屈光度年进展(从 > -1.00 D 降至 < -0.50 D)<sup>[9]</sup>。3 a 的随访显示 PSR 组眼轴和屈光度保持稳定,对照组则持续恶化<sup>[22-23]</sup>。儿童患者术后眼轴年伸长率显著低于术前<sup>[10]</sup>。但目前针对 3-6 岁学龄前儿童的早期干预研究仍为空白,缺乏早期干预的最佳手术时机及植片材料的个体化选择标准。然而,PSR 的长期疗效主要体现在 PS 的新发与异位风险及二次手术需求两方面。

**4.1.1 后巩膜葡萄肿的新发与异位** 长期随访发现,部分患者术后可能出现 PS 新发或在非术区异位加重,发生率约 3.7%-6.7%,核心原因与植片覆盖范围不足、局部巩膜生物力学特性差异有关。张雅雅<sup>[15]</sup>报告 1 例(3.7%)术后 1 a 在鼻侧出现新的轻度 PS,因术前鼻侧巩膜已变薄,常规植片未覆盖该区域。利佩茜<sup>[7]</sup>发现 2 眼(6.1%)分别在颞下及下方出现新的 PS,分别源于未覆盖隐性薄弱区或植片贴合不佳。齐越等<sup>[8]</sup>在 60 眼术后 5 a 随访中发现 4 眼(6.7%)非术区 PS 进展(鼻侧 2 眼、颞上 2 眼),与“U 型覆盖黄斑区”的设计未能兼顾全周巩膜薄弱区相关,提示术前仅评估黄斑区而忽视其他象限隐性薄弱区,可能增加异位 PS 风险。

**4.1.2 二次手术的需求** 部分患者因植片降解、加固不足或原有 PS 进展需二次手术,发生率与植片材料、年龄及手术设计密切相关,约为 5%-6.9%。采用异体巩膜的 60 眼中 3 眼(5%)术后 3-4 a 因植片部分降解致眼轴再次增长(>0.3 mm/a),二次手术更换为京尼平交联异体硬脑膜植片后,眼轴增长控制在 0.15±0.08 mm,提示非交联材料远期降解可诱发二次手术需求<sup>[8]</sup>。肖春婷等<sup>[9]</sup>随访 58 例患儿,4 例(6.9%)在术后 3-4 a 眼轴再次增长(>0.4 mm/a),其中 3 例为青春期(12-14 岁),1 例为植片固定不牢,导致下方巩膜失去支撑,二次手术通过延长植片长度、增加固定点后眼轴得到控制。

**4.1.3 长期疗效的局限性及应对策略与未来研究方向** 术前采用 3D MRI 全面评估全周巩膜厚度及 PS 分布<sup>[11]</sup>,个性化设计植片覆盖范围,避免遗漏隐性薄弱区;选择京尼平交联植片以提升长期稳定性;对青春期中高风险人群缩

短随访间隔至 6 mo,早期监测眼轴及 PS 变化。上述局限性均为小概率轻度病变,未削弱 PSR 对眼轴、屈光度的核心控制作用,负面影响不足 10%,其临床获益远大于局限性带来的不良影响。但目前研究均为单中心小样本(30-60 眼)回顾性分析,且无统一的 PS 诊断与随访评价标准,这源于病理性近视异质性强、PSR 标准化术式推广时间短等客观因素。未来需开展多中心大样本前瞻性研究,制定统一研究标准,验证个性化植片设计、新型交联材料对降低 PS 新发率及二次手术率的效果,同时探索 PSR 与巩膜胶原交联术等联合方案的长期协同作用。

**4.2 视功能与眼底结构的综合改善** PSR 能有效稳定或轻度提高患者的 BCVA,术后 BCVA 提高 2 行及以上者占 41.7%<sup>[24]</sup>。平均提高 0.12 LogMAR<sup>[25]</sup>。PSR 能安全有效地延缓眼轴和屈光度进展,Miao 等<sup>[26]</sup>报道 BCVA(LogMAR)从术前的 0.45 降至 0.27( $P<0.001$ ),眼轴年增长率仅为 0.14 mm,屈光度年进展为 0.12 D,Széll 等<sup>[27]</sup>也认同上述观点。对病理性近视黄斑劈裂疗效显著,术后劈裂腔厚度平均减少 120 μm,81.5%的患眼实现完全或部分复位<sup>[15]</sup>。PSR 联合玻璃体切除术治疗病理性近视黄斑劈裂可获得长期良好结局<sup>[28]</sup>。微循环方面,OCTA 证实儿童黄斑区血管密度提升<sup>[10]</sup>,改善近视眼的血液循环<sup>[29]</sup>。且能减轻眼内牵拉、维持了眼底原有形态<sup>[30]</sup>。Wu 等<sup>[31]</sup>报道 PSR 术后 6 mo 视网膜曲率从 0.77 D/mm 降至 0.48 D/mm,AL 从 28.61 mm 缩短至 27.98 mm,两者强相关( $r_s=0.861$ ),曲率变平与深层毛细血管密度负相关( $r_s=-0.756$ )。Mao 等<sup>[32]</sup>报告术后浅层毛细血管密度及脉络膜血管指数显著提升( $P<0.05$ )。有限元模型研究,发现合并 PS 患者视乳头处变形最大、应力最高,模拟证实增加巩膜厚度或弹性模量可显著减少视乳头及筛板的病理性变形,从力学角度解释了 PSR 保护视神经、稳定视功能的机制<sup>[33]</sup>。对合并屈光参差性弱视的儿童行 PSR 联合弱视训练,可使患眼 BCVA 平均提高 0.35 LogMAR,优于单纯戴镜或训练<sup>[34]</sup>。Yu 等<sup>[35]</sup>及 Dong 等<sup>[36]</sup>的研究也获得类似结论。

5 联合治疗新策略

PSR 联合 ICL:成人高度近视患者行“PSR+ICL”联合手术,远期眼轴年增长率(0.045 mm/a)显著低于单纯 ICL 组(0.103 mm/a),且未见黄斑出血等严重并发症<sup>[37]</sup>。PSR 联合白内障:先行 PSR,1 mo 后行白内障手术,联合手术组眼轴年增长 0.08 mm 优于对照组 0.15 mm,且后极部病变更少<sup>[38]</sup>。PSR 联合玻璃体切除术:治疗病理性近视黄斑劈裂,BCVA 从术前平均 0.85 LogMAR 改善至术后 0.52 LogMAR<sup>[29]</sup>。劈裂腔厚度减少超过 50% 者占 76.2%<sup>[39]</sup>,该联合术式同时解决巩膜薄弱和玻璃体视网膜牵引。适应人群:PSR+ICL 适用于需屈光矫正的进展性成人 PM;PSR+白内障适用于中老年患者;PSR+玻璃体切除术用于合并黄斑劈裂等严重眼底病变的患者。

6 总结挑战与未来展望

**6.1 研究总结** 综上所述,标准化单条带 PSR 及不断创新的植入材料,已成为控制 PM 进展的有效且安全的干预手段。其通过机械加固、改善血液循环及生物刺激重塑等多重机制协同发挥作用。大量临床研究和 Meta 分析证实了

PSR 在延缓眼轴增长、稳定屈光度、改善视功能及治疗部分眼底并发症方面的确切疗效。联合治疗策略为不同需求的患者提供了个性化的解决方案。

**6.2 当前的核心争议与未解决问题** 尽管 PSR 的有效性已被多数研究证实,学界仍存在三大核心争议:(1)手术时机,部分学者主张在儿童 6-10 岁尽早干预,术后眼轴年增长率从 $>0.5\text{ mm}$ 降至 $<0.1\text{ mm}$ <sup>[9]</sup>。另一部分认为低龄儿童(尤其 $<8$ 岁)巩膜弹性大、解剖未成熟,过早手术可能影响正常发育<sup>[8]</sup>;(2)植片材料,异体硬脑膜的生物相容性与血供改善效果更优<sup>[6-7]</sup>,而京尼平交联异种材料力学性能更稳定、抗降解强且来源广,非交联异体巩膜植片术后 3-4 a 降解导致二次手术者约占 5%,更换交联材料后眼轴增长得以控制<sup>[8]</sup>;(3)成人手术价值,部分认为成人眼轴长增速放缓,获益小。支持者则强调 PSR 对黄斑劈裂和微循环的改善。黄斑劈裂的复位率达 81.5%<sup>[15]</sup>,术后黄斑区血流密度提升约 15%。临床决策需个体化,上述争议体现了该领域的研究活力与探索空间,需通过更深入的基础研究、大样本前瞻性临床试验和广泛的学术交流形成共识,为 PSR 的临床应用提供更科学的依据。

**6.3 当前临床治疗的影响与未来发展趋势**

**6.3.1 当前临床治疗的影响** 基于现有证据,PSR 在临床实践中的定位已逐步清晰:(1)对于儿童进展性病理性近视,PSR 是控制眼轴延长的有效且安全的手段,尤其适用于眼轴年增长 $\geq 0.5\text{ mm}$ 、伴明显眼底退行性改变者,建议在 6-10 岁期间个体化决策,不应因低龄而一律拒绝;(2)对于成人病理性近视,应重新定义手术成功标准,不以眼轴控制为核心,而以“阻止黄斑劈裂、后巩膜葡萄肿进展及脉络膜新生血管复发”为目标,推荐用于已有严重并发症或快速进展倾向者;(3)精准术前评估应成为常规:3D MRI 用于量化后巩膜葡萄肿形态、指导个体化植片设计,可有效降低异位葡萄肿及视神经损伤风险,建议在有条件的中心积极推广。

**6.3.2 未来发展趋势** (1)技术智能化:人工智能驱动的多模态影像分析平台将实现后巩膜葡萄肿的自动分型、植片长度预测及并发症风险预警,降低技术门槛;机器人辅助手术有望提升植片固定的精准度与可重复性;(2)材料主动化:从“被动支撑”迈向“主动生物强化”,仿生压电等智能材料通过电信号刺激巩膜成纤维细胞胶原合成,已在动物实验中展现控制眼轴增长的潜力,未来需重点解决长期生物相容性和临床转化问题;(3)策略综合化:建立“早期筛查-精准手术-联合治疗-长期管理”的全周期防治体系,探索 PSR 联合低浓度阿托品、角膜塑形镜或巩膜胶原交联术的协同效应,以实现病理性近视的个体化综合干预;(4)证据高级化:需开展多中心、前瞻性、大样本研究,统一疗效评价标准(如以“免于严重视力损害”为主要终点),为手术时机、材料选择和成人适应证的争议提供高级别循证依据。

**利益冲突声明:**本文不存在利益冲突。  
**作者贡献声明:**黄周懿论文选题与修改,初稿撰写,文献检索,数据分析;廖洪霞、刘东成、叶秋英、刘静雯、卢怡洁、王彤森文献检索;秦波选题指导,论文修改及审阅。所有作

者阅读并同意最终的文本。

**参考文献**

[1] 汪宇涵, 乔利亚. 后巩膜加固术治疗病理性近视眼的研究进展. 中华眼科杂志, 2021, 57(12): 952-957.

[2] Liu WF, Liu YQ, Min YL. A comparative analysis of the impact of posterior scleral reinforcement on fundus morphological changes in high myopia. Asian J Surg, 2025, 48(5): 3123-3124.

[3] Wang YH, Xin C, Li XX, et al. Posterior scleral reinforcement surgery effectively slows the rate of high myopic progression in children. J Fr Ophtalmol, 2024, 47(7): 104213.

[4] 党宽荣, 吴桐, 杜红俊. 后巩膜加固术临床应用的研究进展. 国际眼科杂志, 2021, 21(5): 832-835.

[5] 胥静, 谢立科, 郝晓凤, 等. 后巩膜加固术实验研究及临床进展. 中国医药导报, 2019, 16(32): 42-46.

[6] 兰丽霞, 利佩茜, 叶波, 等. 应用异体硬脑膜行改良后巩膜加固术治疗病理性近视的临床效果观察. 中国医学创新, 2024, 21(20): 133-136.

[7] 利佩茜. 应用异体硬脑膜行单条带改良后巩膜加固术治疗病理性近视的临床疗效观察. 南昌大学, 2023.

[8] 齐越, 王宁利, 田佳鑫. 单条带后巩膜加固术治疗病理性近视手术操作建议. 眼科, 2022, 31(1): 65-68.

[9] 肖春婷, 林燕瑜. 改良型后巩膜加固术对病理性近视患者眼部生物学参数的影响. 中国斜视与小儿眼科杂志, 2025, 33(1): 20-23.

[10] Ye HY, Tang RZ, Fang WY, et al. Clinical outcomes of posterior scleral reinforcement in Chinese high myopia children. Sci Rep, 2024, 14(1): 16479.

[11] Liu L, Rong H, Wu D, et al. Analysis of morphological and quantitative changes in pathological myopia and perioperative changes in posterior scleral reinforcement using three-dimensional magnet resonance imaging. Front Bioeng Biotechnol, 2023, 11: 1242440.

[12] 刘明慧, 蔡楚盛, 杜绍林. 多模态成像联合人工智能在高度近视眼底生物参数中的研究. 国际眼科杂志, 2026, 26(3): 477-482.

[13] 安广琪. 利用三维磁共振成像和光相干断层扫描成像对病理性近视后葡萄肿的观察与分析. 郑州大学, 2021.

[14] 华怡红. 高度近视的眼球形态特征与眼底病变的多模影像分析及其相关性研究. 上海交通大学, 2018.

[15] 张雅雅. 改良的后巩膜加固术治疗病理性近视黄斑劈裂的临床疗效分析. 南昌大学, 2024.

[16] Zhang WF, Li BH, Liu ZB, et al. The feasibility and safety of biomaterials for posterior scleral reinforcement in rabbits. Biomed Mater, 2024, 19(5): 10.1088/1748-605X/ad6826.

[17] Ma JL, Wu FY, Liu ZY, et al. Biomechanical considerations of patching material for posterior scleral reinforcement surgery. Front Med, 2022, 9: 888542.

[18] 黄炜琳, 王雪菲, 段安丽. 异种异体巩膜与可塑性加固植片在兔后巩膜加固术中的安全性及早期生物学反应比较. 眼科, 2026, 35(1): 61-66.

[19] Jiang LX, Zhao B, Li Q, et al. A Self - Generated Electricity-Driven Sclera reinforcement bionic piezoelectric patch for Management of High Myopia. J Nanobiotechnol, 2025, 23(1): 470.

[20] de Francesco T, Ianchulev T, Rhee DJ, et al. The evolving surgical paradigm of scleral allograft bio - tissue use in ophthalmic surgery: techniques and clinical indications for ab - externo and ab-interno scleral reinforcement. Clin Ophthalmol, 2024, 18: 1789-1795.

[21] Chaya CJ, Herndon LW, Lince J, et al. Surgical outcomes, ocular safety and tolerability of bio - interventional cyclodialysis with allograft

scleral reinforcement: clinical experience of more than 240 cases. *J Clin Med*, 2024,13(16):4593.

[22] Peng C, Xu J, Ding XY, et al. Effects of posterior scleral reinforcement in pathological myopia: a 3-year follow-up study. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2019,257(3):607-617.

[23] Chen CA, Lin PY, Wu PC. Treatment effect of posterior scleral reinforcement on controlling myopia progression: a systematic review and meta-analysis. *PLoS One*, 2020,15(5):e0233564.

[24] 骆蓉蓉,林敏玲,黄恩娥,等. 后巩膜加固术对病理性近视患儿近期和远期疗效的影响. *中国卫生标准管理*, 2022,13(20), 21-24.

[25] 史冰洁. 后巩膜加固术治疗病理性近视的临床疗效分析. *安徽医科大学*, 2019.

[26] Miao ZQ, Li LJ, Meng XL, et al. Modified posterior scleral reinforcement as a treatment for high myopia in children and its therapeutic effect. *Biomed Res Int*, 2019,2019:5185780.

[27] Széll N, Boross A, Facskó A, et al. Results with posterior scleral reinforcement for progressive highly myopic children in Hungary. *Klin Monbl Augenheilkd*, 2022,239(9):1125-1131.

[28] Huang Y, Qi Y, Wei WB, et al. Long-term outcome of pathologic myopic foveoschisis treated with posterior scleral reinforcement followed by vitrectomy. *Int J Ophthalmol*, 2022,15(6):975-982.

[29] Mo J, Duan AL, Chan SY, et al. Application of optical coherence tomography angiography in assessment of posterior scleral reinforcement for pathologic myopia. *Int J Ophthalmol*, 2016,9(12):1761-1765.

[30] 兰雪莉. 超高度近视患者后巩膜加固术后眼底形态学变化研究. *南昌大学*, 2023.

[31] Wu XX, Tan XY, Nie YY, et al. Regional retinal curvature remodeling and choroidal changes following posterior scleral reinforcement

in high myopia: a quantitative multimodal imaging study. *Photodiagnosis Photodyn Ther*, 2026,57:105317.

[32] Mao YQ, Chen H, Tang YH, et al. Optical coherence tomography angiography study on retinochoroidal thickness and blood flow changes after posterior scleral reinforcement surgery. *Photodiagnosis Photodyn Ther*, 2025,53:104628.

[33] 王燕青,付羽,乔利亚,等. 利用有限元分析高度近视合并后巩膜葡萄肿对视乳头变形的影响. *医用生物力学*, 2026,41(2): 597-603,626.

[34] Wang MS, Dong XR, Liu J, et al. Management of anisometropic amblyopia associated with unilateral high myopia in children with modified posterior scleral reinforcement. *Ophthalmic Res*, 2025,68(1): 381-388.

[35] Yu F, Tang Y, Lin ZH, et al. Efficacy of posterior scleral reinforcement in treating anisometropic amblyopia associated with unilateral high myopia in children. *J Craniofac Surg*, 2025,36(1): e66-e70.

[36] Dong XR, Liu J, Bu J. The efficacy of modified posterior scleral reinforcement with round scleral patches in Chinese children with high myopia. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2020,258(7):1543-1547.

[37] 陈珣,王晓瑛,周行涛,等. 后巩膜加固术(PSR)后 ICL 植入术矫正成人高度近视的临床观察. *复旦学报(医学版)*, 2020, 47(3):404-410.

[38] 史力军,冯亚兰,马悦,等. 后巩膜加固术对病理性近视合并白内障超声乳化手术后疗效的观察. *中国眼耳鼻喉科杂志*, 2020, 20(5):382-385.

[39] Chen H, Tang YH, Ke YY, et al. Efficacy of posterior scleral reinforcement in the management of myopic traction maculopathy: a single-arm retrospective study. *BMC Ophthalmol*, 2025,25(1):515.